

Mg 含量及固溶处理对 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金组织及性能的影响

刘志鹏¹ 马凯杰¹ 廖荣跃¹ 肖 阳^{1,2} 程家尧^{1,2}

(1.郑州轻研合金科技有限公司; 2.中铝郑州有色金属研究院有限公司金属材料研究所)

摘 要 通过真空感应熔炼制备了不同 Mg 含量的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金,采用 OM、XRD、SEM、EDS 分析研究 Mg 含量对合金组织性能的影响。结果表明,添加 Mg 后,合金中针状 AlLi 相逐渐减少,形成新的 Al₂MgLi 共晶相,合金晶粒尺寸不断降低,但 Mg 含量过高时,晶界处粗大共晶相不断增多,对合金力学性能不利。随着 Mg 含量增加,合金的强度呈现先升高后降低的趋势。此外,Mg 对合金断裂方式有一定影响,导致合金塑性下降。固溶处理进一步提升了合金的硬度和抗拉强度,显著改善了合金的塑性,但由于强化相的溶解,合金屈服强度下降。当 Mg 含量为 1% 时,固溶态 Al-Li 合金具有较好的综合力学性能,硬度(HV)、抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为 131.1、432.7 MPa、267.4 MPa、7.62%。

关键词 Al-Li 合金;真空熔铸;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG156.94

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Mg Content and Solution Treatment on Microstructure and Properties of Al-Cu-Li-Sc-Zr Alloy

Liu Zhipeng¹, Ma Kaijie¹, Liao Rongyue¹, Xiao Yang^{1,2}, Cheng Jiayao^{1,2}

(1.Zhengzhou Light Alloy Institute Co., Ltd.; 2.Department of Light Metal, Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd. of CHALCO)

Abstract: Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys with different Mg contents were prepared by vacuum induction melting. The effects of Mg content on the microstructure and properties of the alloy were investigated by OM, XRD, SEM and EDS. The results indicate that after Mg addition, the acicular AlLi phase in the alloy is decreased gradually with forming a new Al₂MgLi eutectic phase, and the grain size of the alloy is decreased continuously. However, when the Mg content is excessive, the coarse eutectic phase at the grain boundary is increased continuously, which is adverse to the mechanical properties of the alloy. With the increase of Mg content, the strength of alloy is increased firstly and then decreased. In addition, Mg has a certain effect on the fracture mode of the alloy, resulting in the decrease of the plasticity. The hardness and tensile strength of the alloy are further improved by solution treatment, which significantly enhance the plasticity, while the yield strength is decreased due to the dissolution of strengthening phase. When the addition of Mg is 1%, the Al-Li alloy in solid solution state exhibits desirable comprehensive mechanical properties, where the hardness, tensile strength, yield strength and elongation of the alloy reach up to 131.1 HV, 432.7 MPa, 267.4 MPa and 7.62%, respectively.

Key Words: Al-Li Alloy, Vacuum Casting, Microstructure, Mechanical Properties

在铝合金中每添加 1% 的 Li,可使合金密度降低 3%,弹性模量增加 6%,刚度提高 15%~20%^[1]。Al-Li 合金作为一种轻质、高强,综合性能优异的金属结构材料,具有较好的充填能力,可以制备复杂结构的薄壁

铸件^[2],因此其在航空、航天领域具有十分广阔的应用前景。采用铸造高强 Al-Li 合金代替常规的铸造高强铝合金,可使结构零件质量减轻 10%~20%,弹性模量提高 10%~15%,刚度提高 15%~20%。鉴于铸造 Al-

收稿日期:2021-09-28;修改稿收到日期:2021-10-27

基金项目:“十三五”装备预研共用技术资助项目(41422010607);装备预研实验室基金资助项目(6142912190102);国家自然科学基金资助项目(51974281)

第一作者简介:刘志鹏,男,1991 年出生,工程师,郑州(450041),E-mail:lzp0925@126.com

通信作者:肖阳,男,1975 年出生,教授级高工,郑州(450041),E-mail:905xy@163.com

引用格式:刘志鹏,马凯杰,廖荣跃,等. Mg 含量及固溶处理对 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):744-748.

LIU Z P, MA K J, LIAO R Y, et al. Effects of Mg content and solution treatment on microstructure and properties of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):744-748.

Li 合金的优异特性,已在 EH101 直升机、F-16 战斗机、米格-29、苏-27、雅克-36 等飞机上均成功使用轻质高强铸造 Al-Li 合金^[3,4]。

目前国内铸造 Al-Li 合金相关应用的报道较少^[5]。20 世纪 90 年代,我国已开展了铸造 Al-Li 合金的研究,彭德林等^[6]、安阁英等^[7]研究了铸造 Al-Li 合金的凝固过程、Al-Li 合金与铸型表面的作用,但由于其在大气下进行 Al-Li 合金的熔炼与铸造,因而吸氢严重,而且 Li 较为活泼,熔体易与铸型反应,铸锭底部气孔及表面缺陷较严重。由于熔铸工艺及铸型界面反应问题无法解决,铸造 Al-Li 合金在国内未能获得较好的应用。为实现航空、航天、武器、装备轻量化,满足其高精度、超远程、超高速打击的发展需求^[8],开发新型轻质高强的铸造 Al-Li 合金具有积极的意义。

本课题采用真空感应炉^[9]制备铸造 Al-Li 合金,可避免吸氢造渣,制备出了高纯净 Al-Li 合金铸锭。设计了 4 组不同 Mg 含量的 Al-Li 合金,分析 Mg 对铸造 Al-Li 合金显微组织及力学性能的影响,为铸造 Al-Li 合金的大规模生产应用提供参考。

1 试验材料和方案

1.1 试验材料

参照 8090 合金成分^[10],结合变形 Al-Li 合金开发经验及前期熔铸试验结果,设计了 4 组不同 Mg 含量的铸造 Al-Li 合金,Li 和 Cu 含量(质量分数,下同)分别为 2.5% 和 2.0%,Mg 含量依次为 0、1.0%、2.0%、3.0%,表 1 为试验合金的实测化学成分。

表 1 试验合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the experimental alloy %						
编号	w_B					
	Li	Cu	Mg	Sc	Zr	Al
1	2.51	2.03	—	0.11	0.09	余量
2	2.49	2.01	1.02	0.10	0.11	余量
3	2.47	1.97	2.01	0.11	0.10	余量
4	2.52	2.01	3.00	0.10	0.11	余量

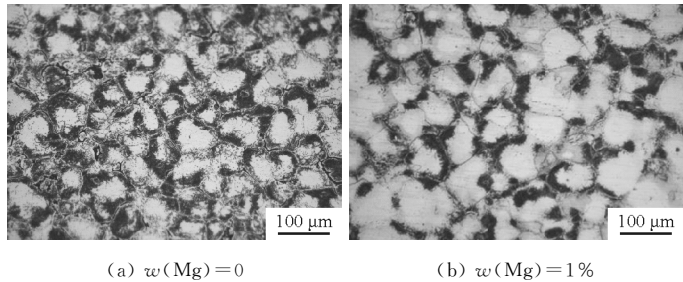


图 2 不同 Mg 含量铸态 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的显微组织

Fig.2 Microstructure of as-cast Al-Cu-Li-Mg-Sc-Zr alloys with different Mg contents

晶界附近的深黑色析出相组成。随 Mg 含量增加,晶界附近的深黑色析出相逐渐减少,由团絮状分布转变为零

1.2 试验方案

使用 ZG-025 真空感应熔炼炉,在真空、氩气保护条件下进行不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金熔炼。原材料分别为高纯 Al($\geq 99.996\%$,质量分数,下同)、纯 Li($\geq 99.9\%$)、纯 Cu($\geq 99.99\%$)、纯 Mg($\geq 99.95\%$),Al-2Sc、Al-10Zr 中间合金。将原材料熔化并充分搅拌后,浇注成 $\phi 95\text{ mm}$ 的铸锭。

成分分析在 IRIS INTREPID 等离子光谱仪上进行,具体测试方法参照 GB/T 20975.25-2008。

试样经粗磨、细磨、抛光后,采用凯勒试剂进行腐蚀,然后在 DM4000M 金相显微镜下进行金相组织观察,微观组织形貌采用 FEI-Quanta-200 扫描电镜进行观察,使用 MPDDY2094 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析。

在铸锭上切取 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 样块,经砂纸粗磨及抛光后,在 HVS-50 数显维氏硬度计上对不同工艺试样进行硬度测试,拉伸试样尺寸见图 1。首先在 CNC 上按照图纸加工成试棒,然后在细砂纸上打磨以消除加工产生的纹路,最后使用 SUM10 电子万能试验机进行拉伸性能测试,拉伸速率为 2 mm/min 。

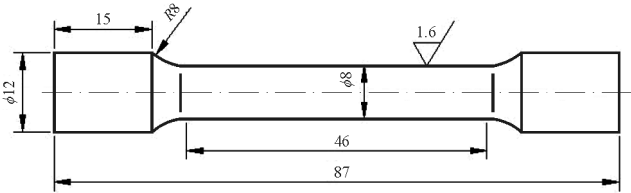
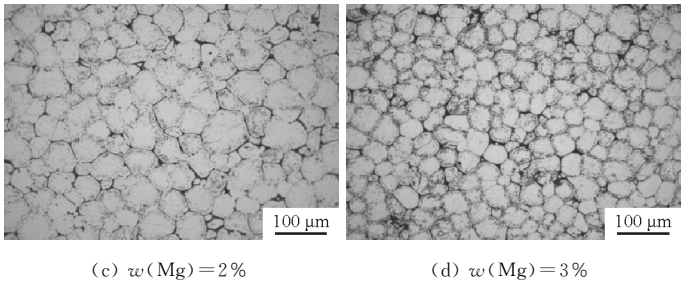


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的铸态显微组织。可以看出,4 种合金铸态组织均为粗大等轴晶,由白色部分的 α -Al 基体、晶界上的灰色共晶相以及



星分布,晶界处的灰色共晶相逐渐增多,合金晶粒尺寸不断减小。未添加 Mg 的晶粒尺寸为 $147.3\text{ }\mu\text{m}$,添加

1%、2%、3% 的 Mg 后合金平均晶粒尺寸依次降低了 12.2%、48.6% 和 50.8%，添加 3% 的 Mg 的合金平均晶粒尺寸为 $72.5\ \mu\text{m}$ 。在 Mg 含量较高合金的非平衡凝固过程中，溶质组元重新分配易导致固液界面前沿 Mg 原子偏聚，从而使合金液产生成分过冷，提高形核率，使晶粒细化^[11,12]。

图 3 为不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的铸态

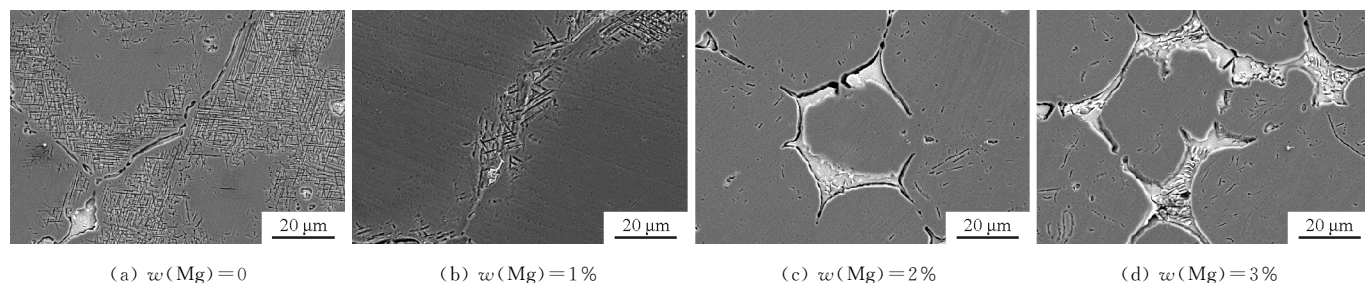


图 3 不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的铸态 SEM 组织

Fig.3 SEM microstructure of as-cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys with different Mg contents

图 4 为不同 Mg 含量的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 铸态合金的 XRD 结果。可以看出，4 种合金中除了 α -Al 基体外，还存在 AlLi、 Al_2MgLi 、 Al_6CuLi_3 等相。在 35° 和 46° 附近出现的 Al_2MgLi 相衍射峰随 Mg 含量的升高而逐渐增强，说明 Al_2MgLi 相的含量随 Mg 含量的增加而增多。 Al_6CuLi_3 相衍射峰强度呈现增强趋势，说明 Mg 添加促进了 Al_6CuLi_3 相的形成^[14]。

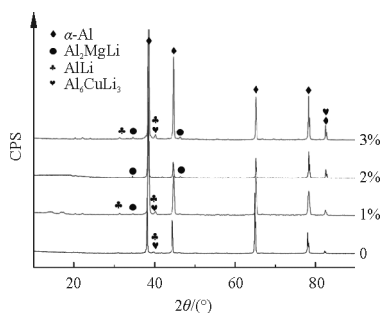


图 4 不同 Mg 含量的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金铸态 XRD 结果

Fig.4 XRD patterns of as-cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys with different Mg contents

图 5 为铸态 Al-Cu-Li-Mg-Sc-Zr 合金的 SEM 形貌和 EDS 分析结果。EDS 面扫描结果显示针状相处的

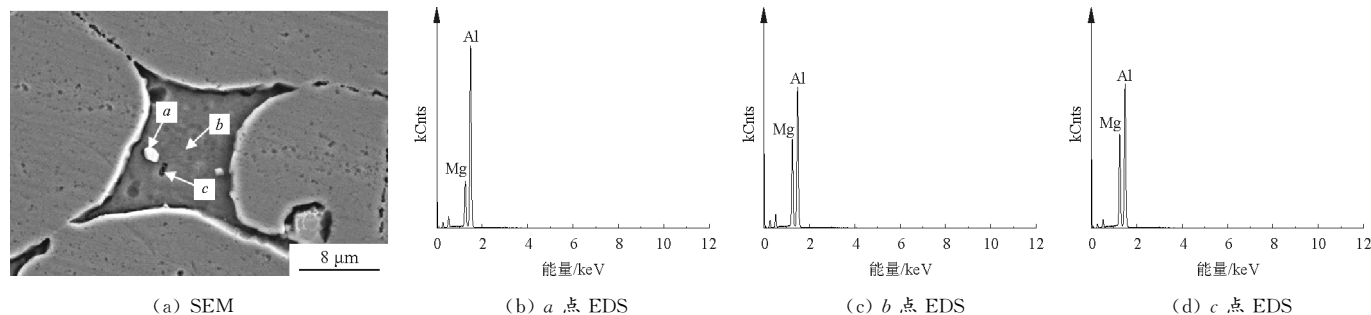


图 5 未添加 Mg 时 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金铸态 SEM 形貌及 EDS 分析

Fig.5 SEM morphology and EDS results of as-cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys without Mg addition

图 6 是 Mg 含量为 3% 的 Al-Cu-Li-Mg-Sc-Zr 合金铸态共晶相处 EDS 结果。 a 、 b 、 c 点的主要成分都为 Al 和 Mg，Al 和 Mg 摩尔比分别为 84.70 : 16.30、69.26 : 30.74、68.95 : 31.05，白色颗粒为析出相，点 b 和点 c 的 Al 和 Mg 摩尔比接近 2 : 1，而钨探头不能识别 Li 元

图 6 Mg 含量为 3% 的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金铸态 SEM 形貌及 EDS 分析

Fig.6 SEM morphology and EDS analysis of as-cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy with 3% Mg content

素,结合 XRD 分析合金中含有 Al_2MgLi 相,说明合金晶界处的灰色粗大共晶相为 Al_2MgLi [16]。

图 7 为不同 Mg 含量的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金经 $460\text{ }^\circ\text{C}\times 12\text{ h}+525\text{ }^\circ\text{C}\times 24\text{ h}+$ 水冷双级固溶处理后的微观组织。与原始铸态组织进行对比,发现 Mg 含量为 1% 的合金固溶效果最好,固溶后残留的粗大相最少。不同 Mg 含量的合金固溶后晶粒均有长大趋势,晶界处的第

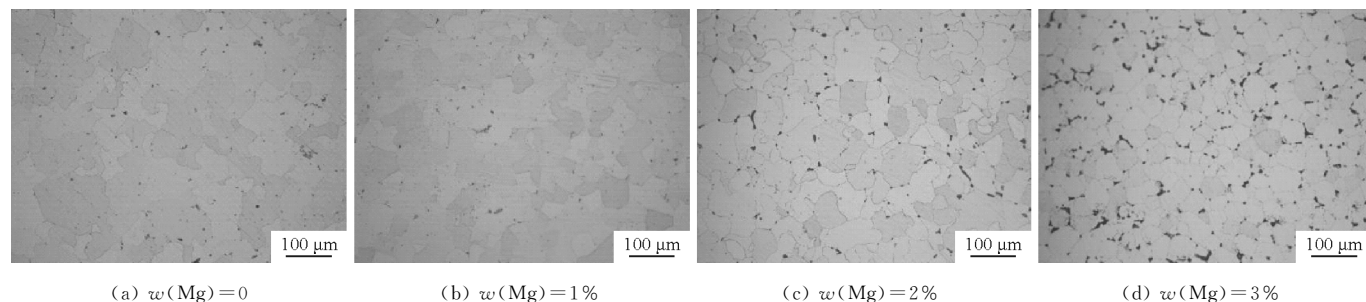


图 7 不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的固溶态金相组织

Fig.7 Metallographic microstructure of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys in solid solution state with different Mg contents

2.2 力学性能

图 8 为不同 Mg 含量的铸态和固溶态 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的维氏硬度。可以看出,铸态和固溶态合金的硬度都是随 Mg 含量增加而升高,但增幅逐渐降低,Mg 含量为 3% 的铸态合金硬度(HV)最高,为 117.6,较未加 Mg 的合金硬度提升了 85.5%。固溶处理可进一步提升合金硬度,Mg 含量为 3% 的固溶态合金硬度(HV)为 135.2,较相同 Mg 含量铸态合金硬度提升了 15%。

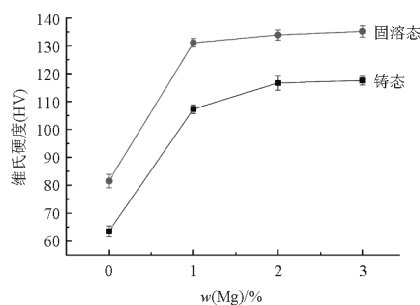


图 8 不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的硬度

Fig.8 Hardness of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys with different Mg contents

Mg 的添加可以显著提升合金的硬度,一方面,随着 Mg 含量增加,合金铸态组织中形成了新的强化相 Al_2MgLi ,并在晶界上逐渐积聚增多,与 $\alpha\text{-Al}$ 基体结合形成共晶化合物,这些共晶相有硬脆的特性,从而提高合金的硬度;另一方面,Mg 可有效细化合金晶粒尺寸,导致硬度升高。

图 9 和图 10 分别为不同 Mg 含量铸态和固溶态 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的力学性能。可见随着 Mg 含量增加,合金的强度均呈先上升后下降趋势。当 Mg 含量

二相以溶质原子的形式固溶到基体晶格中,晶界上的共晶相由铸态时的连续分布转变为不连续分布,因此晶界附近仅能观察到少量棒状共晶相,晶界明显窄化。从图 7c 和图 7d 可以看出,合金组织中残留的未溶相随 Mg 含量升高而增多,这是由于晶界处的 Al_2MgLi 粗大共晶相,在热处理过程中难以全部回溶至基体中,这些粗大共晶相的存在,不利于合金强塑性的提升 [17]。

为 1% 时达到最大值,此时铸态抗拉强度、屈服强度分别为 342.2 MPa 和 327.1 MPa,较未加 Mg 的合金分别提高了 34.3%、82.0%,而伸长率仅为 1.67%,降低了 74.3%。固溶处理进一步提升了合金的抗拉强度,显著改善了合金的塑性,但由于强化相的溶解,合金屈服强度下降。当 Mg 含量为 1% 时,固溶态铸造 Al-Li 合金具有最优的综合力学性能,抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为 432.7 MPa、267.4 MPa、7.62%。Mg 的添加细化了合金晶粒,同时促进合金中的 Al_2MgLi 及 Al_6CuLi_3 相的形成,提升了合金强度。但随着 Mg 含量进一步增加,晶界处 Al_2MgLi 相不断聚集粗化,易割裂基体,导致合金强度下降。

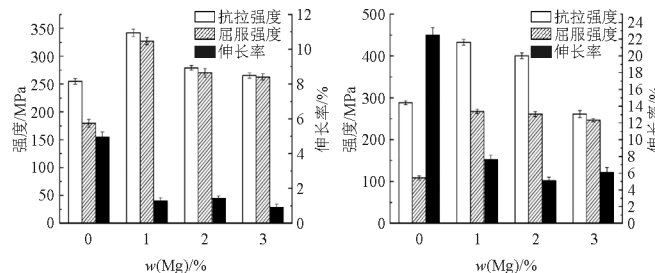


图 9 不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的铸态力学性能

Fig.9 As-cast mechanical properties of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys with different Mg contents

图 10 不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的固溶态拉伸性能

Fig.10 Mechanical properties of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloys in solid solution state with different Mg contents

2.3 拉伸断口形貌

图 11 为不同 Mg 含量 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的铸态拉伸断口形貌。从图 11a、图 11b 可以看出,未添加 Mg

时合金断口存在解理平面、解理台阶、二次裂纹、河流花样、撕裂棱特征,并有少量韧窝,表现为脆性断裂。由图 11c、图 11d 可知,Mg 含量为 1% 的合金断口形貌未发现断裂韧窝,主要表现为解理台阶形的脆性断裂^[18],其伸长率也较未添加 Mg 的合金低。铸造 Al-Li 合金本

身塑性较差,添加 Mg 后,在晶界形成更多的 Al_2MgLi 及 Al_6CuLi_3 共晶相,而这些共晶相均为硬脆相,在起到钉扎晶界、阻碍晶界运动作用的同时,也易成为裂纹源,导致合金的伸长率主要受基体组织影响,并不严格受晶粒尺寸的影响。固溶处理后,随着共晶相溶解,合金塑

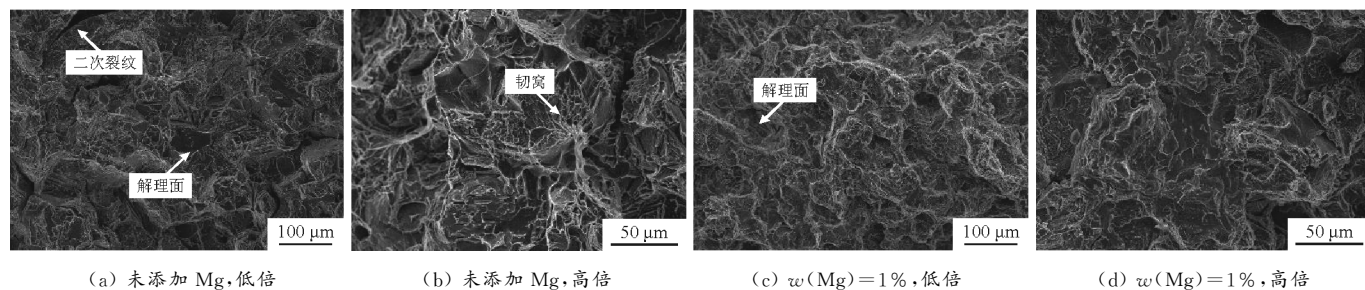


图 11 未添加 Mg 与 Mg 含量为 1% 的 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金铸态拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphologies of as-cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy without Mg and with 1% Mg content

性得到改善,伸长率显著提升。

3 结 论

(1)在 0~3% 内,随着 Mg 含量增加,Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金铸态平均晶粒尺寸逐渐减小,Mg 含量为 3% 时,晶粒尺寸达到 $72.5\ \mu\text{m}$,较未加 Mg 的合金降低 50.8%,晶界上的共晶相逐渐增多,晶界附近的针状 δ' - Al_3Li 相逐渐减少。在 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金中添加 Mg,可细化合金晶粒尺寸,促进 Al_2MgLi 和 Al_6CuLi_3 相的形成,提升合金强度。但 Mg 含量过高,会导致晶界处的共晶相聚集粗化,对合金性能产生不利影响。

(2)Mg 可以显著提升 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金的硬度。铸态和固溶态合金的硬度都是随 Mg 含量增加而升高,但增幅逐渐降低。Mg 含量为 3% 的合金硬度 (HV) 最高,铸态和固溶态分别为 117.6 和 135.2。随着 Mg 含量增加,合金晶界上形成具有硬脆特性的共晶相 Al_2MgLi ,从而提高合金的硬度;同时 Mg 还可细化合金晶粒尺寸,导致硬度升高。

(3)随着 Mg 含量增加,Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金强度呈先上升后下降趋势,塑性随着 Mg 含量增加呈下降趋势。Mg 含量为 1% 时达到最大值,此时铸态抗拉强度、屈服强度分别为 342.2 MPa 和 327.1 MPa,较未加 Mg 的合金分别提高了 34.3%、82.0%,而伸长率为 1.67%,降低了 74.3%。

(4)固溶处理可以显著改善合金塑性,Mg 含量为 1% 时,固溶态 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金伸长率较铸态提升 500%。此时综合力学性能最优,抗拉强度达到 432.7 MPa、屈服强度达到 267.4 MPa、伸长率达到 7.62%。

参 考 文 献

[1] EL-ATY A A, XU Y, GUO X, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-

Li alloys: A review[J]. Journal of Advanced Research, 2018, C10: 49-67.
 [2] 彭德林,陆政. Al-Li 合金铸件的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 1992(1): 21-23.
 [3] 尹登峰,郑子樵. Al-Li 合金研究开发的历史与现状[J]. 材料导报, 2003, 17(2): 18-20.
 [4] 樊振中,陆政,张显峰,等. 铸造 Al-Li 合金研究进展及应用趋势[A]. 中国铸造活动周[C]. 郑州, 2014.
 [5] 吴国华,孙江伟,张亮,等. Al-Li 合金材料研究应用现状与展望[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 52(2): 35-50.
 [6] 彭德林,陆政. 铸造 Al-Li 合金凝固过程及形成的组织的研究[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(2): 60-64.
 [7] 安阁英,闵光辉,彭德林,等. Al-Li 合金与铸型表面作用的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1992(2): 5-7.
 [8] EBENSPERGER A, MAXWELL P, MOSCOSO C. The lithium industry: Its recent evolution and future prospects[J]. Resources Policy, 2006, 30(3): 218-231.
 [9] 朱德云,强俊. Al-Li 合金熔铸设备的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1993(5): 29-30.
 [10] 王祝堂. 航空航天器用铝材手册[M]. 长沙:中南大学出版社, 2015.
 [11] 李勇,朱应禄. Si 和 Mg 对铝合金熔体采用细化剂效果的影响[J]. 轻合金加工技术, 2005(11): 24-26.
 [12] LEE Y C, DAHLE A K, STJOHN D H. The role of solute in grain refinement of magnesium[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2000, A31(11): 2 895-2 906.
 [13] 晁月雨. 铸造 Al-2.5Li-5Mg-1Cu 合金晶粒细化与热处理工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
 [14] 张亮,张小龙,吴国华. Mg 对铸造 Al-2Li-2Cu-0.2Zr 合金强韧性的影响[A]. 2017 中国铸造活动周[C]. 武汉, 2017.
 [15] 李学朝. 铝合金材料组织与金相图谱[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
 [16] 杨凯. 铸造 Al-Li 合金组织及力学性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
 [17] 陈飏,赵平. 铸造 Al-Li 合金热处理工艺的研究[J]. 铸造, 2006, 55(2): 132-134.
 [18] 赵忠魁. 含锂铝合金的组织与性能[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.

(编辑:栗万仲)